



# 北斗时间传递链路绝对校准

时间是当前准确度最高、应用最广的物理量，高精度时间频率已成为国家科技发展、经济运行、军事安全和社会管理的关键基础参量，对国家整体安全稳定具有重要作用。近年来，“精准时频网络链路校准技术”课题组开展北斗卫星导航系统时间传递链路和装置的绝对校准和差分校准方法等相关研究，取得了多项创新成果。

**在**时频传递系统中，传递链路的精密校准是进行高精度时间传递的重要前提，是国际标准时间协调世界时（UTC）生成和向下传递的关键环节。当前，国际上全球导航卫星系统（GNSS）时间传递链路常用的校准方法主要有差分校准和分步绝对校准两种。差分校准方法由国际计量局（BIPM）提出并不断进化，目前是UTC时间链路校准的主要手段，但其不确定度限制在1.5~2 ns，成为制约GNSS时间传递不确定度水平提升的瓶颈。分步绝对校准方法由美国海军研究所（NRL）提出，近年来，法国国家空间研究中心（CNES）和欧洲航天局（ESA）对分步绝对校准方法进行时间传递链路校准研究、测试和评定。现如今，我国自主研发的北斗卫星导航系统（BDS）快速发展，已成为GNSS的重要组成部分，在国家重点研发计划项目“空间导航与定位NQI技术集成及应用示范”的支持下，实现了对北斗时间传递性能的全球验证，科技部对此进行了专报报道。北斗时间传递链路正逐渐成为国际标准时间UTC生成的主要比对链路之一，低不确定度的北斗时间传递链路校准变得越发重要，已成为近年的研

究热点。分步绝对校准方法步骤烦琐且复杂，导致校准过程中不确定度来源众多，测量不确定度难以改善。课题组核心成员曾应CNES邀请，基于自研的北斗时间传递装置，参与北斗时间传递链路分步绝对校准的合作研究，研究结果在联合国全球导航卫星系统国际委员会（ICG）上进行了展示交流。近期，区别于传统的分步绝对校准技术，课题组提出了一种整体绝对校准方法，校准原理如图1所示。该方法将时间传递装置作为整体，对其整体时延进行校准，简化校准步骤，减少不确定度来源，降低不确定度。整体绝对校准是在传递链路作为整体工作时，对时延进行一次标定，通过模拟北斗卫星导航信号解算时间传递链路整体时延值，补偿了时间传递链路主机与GNSS模拟器伪距时延 $t_g$ 、GNSS信号模拟器时延 $t_{sim}$ 和链路参考时延 $t_{ref}$ 。相比分步绝对校准，射频信号路径插入发射天线、气隙与接收天线，综合为射频发射路径时延 $t_{trans}$ ，无须进行GNSS接收天线单独校准，可解算出整体传递链路延迟 $t_x = t_g + t_{sim} + t_{trans} + t_{ref}$ 。进一步，课题组构建了时间传递链路绝

对校准系统（见图2），实施了北斗时间传递链路校准实验，并基于多条实际链路利用分步绝对校准方法和差分校准方法成功进行了交叉验证，整体和分步绝对校准的合成标准不确定度分别为0.7 ns和1.0 ns，差分校准的合成标准不确定度为1.2 ns，充分验证了整体绝对校准方法与系统的有效性、实用性，并且研究成果成功应用于北京卫星导航中心和中国计量科学研究院。在2024年的欧洲频率与时间论坛（EFTF）和国际计量测试联合会（IMEKO）上，课题组对研究成果

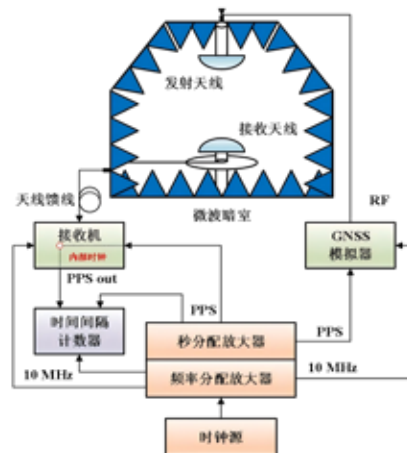


图1 整体绝对校准原理

分别进行了口头报告，同时受邀在全国时间频率学术会议作报告（见图3），并与校准研究的资深研究机构 CNES 与 BIPM 同行现场进行了深入讨论和交流。本研究方法与系统不仅可提升北斗时间频率传递链路的溯源精确性和可靠性，还为推动北斗系统在 UTC 生成和全球统一时间体系中发挥核心作用提供了坚实支撑。

此外，课题组突破基于多系统闭环测量的 GNSS 时间传递装置原位校准技术，研发了移动差分校准系统（见图4），不确定度优于 2 ns，在 2017 年欧洲频率与时间论坛暨国际频率控制大会（EFTF-IFCS）上作相关主题报告，其中首次实现自主校准 UTC(NIM)<sup>①</sup>与 UTC 的时间传递链路，并获得 BIPM 认可。课题组研发的校准系统在日本国家信息与通信技术研究所（NICT）和中国台湾中华电信实验室（TL）成功进行了校准示范；牵头完成的亚太计量规划组织（APMP）创新项目，为澳大利亚国家计量院（NMI）、新西兰计量标准研究院（MSL）、韩国标准与科学研究院（KRISS）和中国科学院国家授时中心（NTSC）等国内外重要时频机构提供校准服务，校准结果获得 BIPM 认可，结果发布在《时间公报》（Circular T）上，时间传递链路不确定度由最大 20 ns 降至约 2.5 ns，显著提高了 UTC(k) 的时间溯源准确性，提升了我国参与国际原子时（TAI）合作的各 UTC(k) 的整体水平，促进了国际标准时间更精准传递；完成的 TAI 合作中的国际 G2 实验室的 UTC 时间链路校准任务，也是时间频率关键比对的一部分，为 UTC 的精确生成提供支撑；自主研发的绝对校准和差分校准，融合实现了全场景的低不确定度 GNSS 时间传递链路校准方法与系统的构建。

GNSS 时间传递链路整体绝对校准方法有效实现了不同 GNSS 系统时间传递链路的硬件延迟测量，解决了低不确定度 GNSS 时间传递的瓶颈问题，未来将成为高精度 GNSS 时间同步的核心支撑。此外，受 BIPM 邀请，课题组于 2025 年底对用于校准 UTC 时间传



图2 绝对校准系统总体构成图



图3 梁坤教授在 2023 年全国时间频率学术会议和 2024 年 EFTF 上进行汇报



图4 可移动差分校准系统（室内和室外）

递链路的旅行系统进行多系统多频点的校准实验，验证北斗时间传递链路传递准确性，进一步推动整体绝对校准技术在全球 GNSS 时间传递系统中的广泛应用。

**致谢：**感谢国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项课题“精准时频网络链路校准技术”（2021YFB3900704）的支持。

作者：梁坤、李德楠

注① .UTC(k) 是 UTC 在国际原子时合作各实验室（k 表示各实验室的代号）产生的实际物理时间。UTC(NIM) 是由中国计量科学研究院（NIM）建立并持有的本地协调世界时，是我国的原子时标准国家计量基准。

（梁坤，北京交通大学教授，泰山产业创新领军人才，主要研究领域为 GNSS 相关技术、应用和测试，以及时间频率同步与保持等；李德楠，北京交通大学硕士研究生）